

不同类型岩土浸泡水实验分析

张洪英¹, 高宗军¹, 李 伟², 时孟杰¹, 牟林凯¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要:为研究降水补给地下水过程中在包气带发生的物质交换及地下水化学演化的特征,在沂源地区采集不同类型的岩土样品 11 组,按 5 min 和 48 h 的浸泡时间以 1:5 的固液比分两组进行了浸泡试验,检测并分析了不同岩土浸泡水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 等组成及含量变化。结果表明,不同类型岩土样品经浸泡后均有大量物质进入浸泡水中,并随浸泡时间的延长,除个别离子含量减少外, K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等大部分离子均出现不同程度增加。说明在天然降水补给地下水过程中,降水通过对包气带的淋溶作用,使包气带岩土中的大量物质转入水中,水化学性质发生重大变化。由此可认定,地下水的大部分化学组分来源于降水转化为地下水过程中包气带的淋溶作用。

关键词: 岩土; 浸泡; 离子; 地下水; 水文地球化学

中图分类号: P641.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)06-0010-07

Analysis of Different Types of Rock-soil in Soaking Experiment

ZHANG Hongying¹, GAO Zongjun¹, LI Wei², SHI Mengjie¹, MOU Linkai¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and

Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geology Survey, Baoding, Hebei 071051, China)

Abstract: In order to study the characteristics of substance exchange and the chemical evolution of groundwater in the aeration zone during precipitation recharge, 11 groups of different types of rock-soil samples were collected in Yiyuan, Shandong province, and they were divided, according to the solid-liquid ratio of 1:5, into 2 groups for soaking test with 5 min and 48 h of soaking time respectively. The composition and content characteristics of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , and NO_3^- in different types of rock-soil soaking water were detected and analyzed. Results of the soaking experiment show that a large number of substances in the rock-soil samples have entered into the soaking water after they are soaked and that with the increase of the soaking time, the contents of most ions such as K^+ , Na^+ , Cl^- and SO_4^{2-} have increased in varying degrees, with only a few exceptions. This means that in the process of precipitation recharge a large number of substances have been leached out from rock-soil in the aeration zone into the groundwater whose chemical properties has changed greatly. Thus it can be concluded that most chemical constituents of groundwater come from the leaching process of the aeration zone during precipitation recharge to groundwater.

Key words: rock-soil; soaking; ions; groundwater; hydrogeochemistry

收稿日期: 2016-01-28

基金项目: 中国地质调查局《沂蒙山革命老区 1:5 万水文地质调查(121201012000150003)》项目

作者简介: 张洪英(1990—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事水工环地质方面的研究. E-mail: 18765926442@163.com

高宗军(1964—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士, 主要从事水文地质、环境地质、生态地质等领域研究, 本文通信作者.

E-mail: gaozongjun@126.com

地下水作为地球水循环的主要组成部分,其水化学性质的优劣对生态环境保护与人类生活及生存发展都具有极其重要意义。地下水化学成分的来源、化学性质的形成及其演化早已成为人们研究的焦点,因而对于降水和地表水通过包气带向下运移形成地下水过程中的水化学变化的研究日益受到重视^[1-2]。降水是植物营养循环以及溶解物质和悬浮微粒转运的载体;降水作为营养元素的携带者和溶剂,吸收大气中的各种化学成分、浮游物以及尘粒,以溶解态或以有机或无机微粒形式输入生态系统,是系统重要的环境输入源,在其动态中起着重要作用^[3]。但是,降水转化为地下水后,水化学性质发生了巨大变化,其物质成分的来源及变化机理值得研究。目前,国内外学者开始注重岩溶地区中土地利用方式或污染对地下水水质影响的研究^[4],或对短时间尺度常规的岩溶水文地球化学指标进行了较为深入的研究^[5],而对于降雨期间雨水或地表水通过包气带入渗补给地下水过程中的水化学变化及其机理研究较少。本文拟通过不同浸泡时间不同岩土浸泡水的化学组分的变化,探讨包气带中的淋溶作用所做的贡献。

作者采集了沂源地区 11 组不同岩土样品(表 1),按岩土性质可分为 5 类:白云岩、泥灰岩、灰岩、花岗岩、表层土壤。在室内对所取岩土样进行浸泡试验,检测各岩土样浸泡水的常规水质指标,对比分析不同岩土样浸泡水的化学特征,以探索降水或地表水经包气带补给地下水过程中发生的化学组分及性质的变化,对研究该区域地下水演化过程具有重要意义。

表 1 取样点位置

Tab. 1 Sampling point position

编号	YS-1	YS-2	YS-3	YS-4	YS-05	YS-6	YS-7	YS-8	YS-9	YS-10	YS-11
采样地点	玉泉寺	玉泉寺	玉泉寺	永兴官庄	历山公园	黄崖	芦芽	东松仙岭	东松仙岭	土门	东北麻
岩性	泥灰岩	白云岩	土壤	灰岩	灰岩	灰岩	灰岩	灰岩	花岗岩	土壤	土壤
备注	山坡上	山坡上	河边耕植土	田庄水库附近	山坡下	山坡下	山坡	山坡下	山坡	耕植土	黄土

1 研究区概况

沂源是沂河的发源地,是典型的北方岩溶低山丘陵区,地形起伏较大。该区毗邻郯庐断裂带,构造作用强烈,构造类型多样,既有断陷、单斜盆地,也有大的褶曲构造(图 1)。地层出露较全,既有太古代、元古代、中生代侵入岩体和早期的变质岩分布,也有寒武纪、奥陶纪碳酸盐岩以及页岩、石炭纪、二叠纪、侏罗纪、白垩纪和古近纪砂岩等碎屑岩类沉积地层,在局部低洼地带具有第四纪现代堆积物,因而地下水类型多样,主要有碳酸盐岩岩溶裂隙水、岩浆岩变质岩块状裂隙水及第四系松散沉积物孔隙水。为对应地下水类型,本次在全区分散采集了花岗岩、石灰岩、泥灰岩及第四系土壤样品(图 1)。

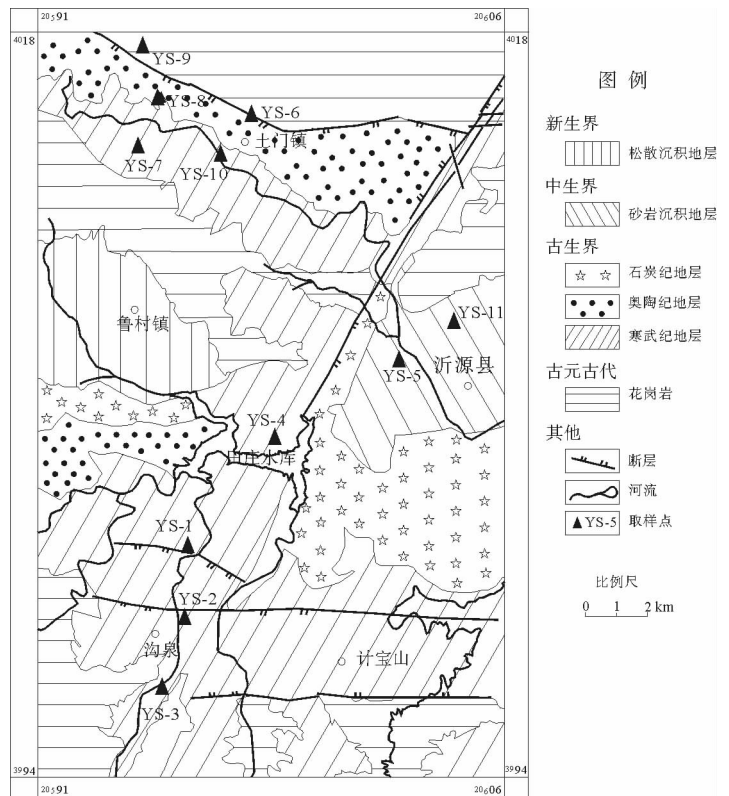


图 1 研究区地质及采样点分布图

Fig. 1 Geology and sampling point distributions of study area

2 试验目的及方法

浸泡试验也可称作极限淋溶试验,试验过程可视为对岩土样品在饱水条件下进行溶滤作用。本文试验参照《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)中的“易溶盐检测”方法进行。试验中,岩土样品与蒸馏水以 1:5 的固液比混合浸泡,之后按照预定时间滤取岩土样浸泡液进行常规水质指标的检测^[6-9]。

2.1 试验目的

通过试验,分析沂源不同类型岩土样浸泡液的水化学变化特征,研究降水经过包气带补给地下水时的水化学变化过程。

2.2 试验方法

参照“土工试验标准”,具体试验方法如下:①将采集的 11 组不同类型的岩土样品粉碎、筛分,做预处理;②每组分别称取 2 份预处理后的岩土样品,以蒸馏水按 1:5 的固液比进行混合浸泡;③按 5 min 和 48 h 的浸泡时间分两组进行试验;④两组试验结束后分别滤取浸泡液作为检测水样^[10-12];⑤检测各浸泡液中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 等离子的含量。

3 试验结果

对不同岩土样浸泡液检测结果数据进行整理,绘制对比分析图(图 2~9),对试验结果进行分析。

3.1 各岩土样浸泡液水化学特征

由试验检测结果,计算各岩土样浸泡液中各离子毫克当量(meq/L),绘制不同浸泡时间各岩土样浸泡液的离子组成柱状图。见图 2~3。

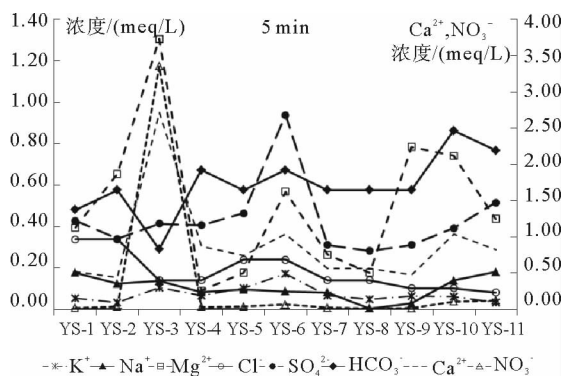


图 2 岩土样 5 min 浸泡液离子浓度柱状图

Fig. 2 Ionic concentration histogram of rock and soil soak solution(5 min)

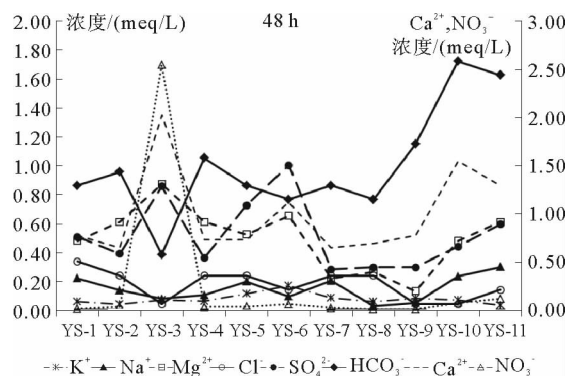


图 3 岩土样 48 h 浸泡液离子浓度柱状图

Fig. 3 Ionic concentration histogram of rock and soil soak solution(48 h)

由图 2、图 3 可以看出:①各岩土样浸泡液中阳离子均以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子为主,阴离子除 YS-3 样品外均以 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 离子为主,这与岩溶地区地表岩土富含方解石、白云石等碳酸盐岩矿物的地质环境相符;②YS-3 样品为河边农田耕植土,其浸泡液具有较高的毫克当量浓度,且 NO_3^- 离子占阴离子比重较高,浸泡 5 min 时浸泡液离子浓度达 8.45 meq/L,浸泡液 NO_3^- 离子占阴离子总毫克当量的 80.02%,这可能与农田施加氮肥及人类活动产生的富含 NO_3^- 离子的污水沿河流排放有关;③土壤样品(YS-3、YS-10、YS-11)浸泡液离子的毫克当量明显高于白云岩、泥灰岩、灰岩及花岗岩等其他岩土样品,可能是因为土壤具有较大的孔隙度和强吸附能力和纳污能力,在长期地质作用中富集了较多可溶性物质组分;④除 YS-3 样品外,各岩土样 48 h 浸泡液离子的毫克当量浓度明显高于 5 min 的,其中 YS-11 土壤样品浸泡液离子浓度增加了 1.77 meq/L。这说明岩土样品中可溶性矿物离子的溶解释放是一个缓慢的过程,需要较长时间才能达到平衡。而 YS-3 土壤样品总离子浓度不升反降,认为可能与土壤矿物组成、浸泡过程中土壤颗粒结构改变、浸

泡液离子浓度较高亦或其他水岩相互作用等多种因素有关。

3.2 各岩土样浸泡液水化学组分变化特征

对各类岩土样浸泡液进行分析,计算浸泡液水化学组分中各离子的增量

$$V_i = \frac{C_{i-48} - C_{i-5}}{C_{i-5}} \times 100\% \quad (1)$$

其中: V_i 为浸泡液水化学组分中*i*离子的增量;*i*为浸泡液水化学组分中的某一离子; C_{i-5} 为浸泡5 min时浸泡液中*i*离子的浓度; C_{i-48} 为浸泡48 h时浸泡液中*i*离子的浓度。

由浸泡液水化学组分中各离子增量的计算结果,绘制各类型岩土样品浸泡液水化学组分中各离子变化特征对比图。

3.2.1 不同类型岩土样浸泡液水化学组分变化特征

以YS-1泥灰岩、YS-2白云岩、YS-8灰岩、YS-9花岗岩、YS-11土壤的浸泡液检测数据为例,对增量进行分析,如图4、图5所示。

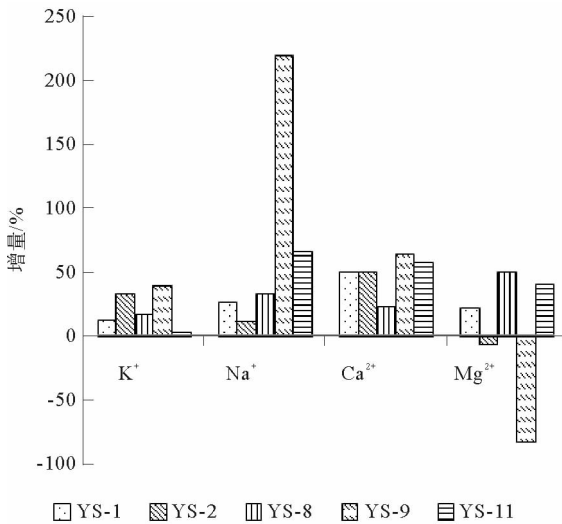


图4 不同岩土阳离子对比图

Fig. 4 Comparison of different rock-soil cation

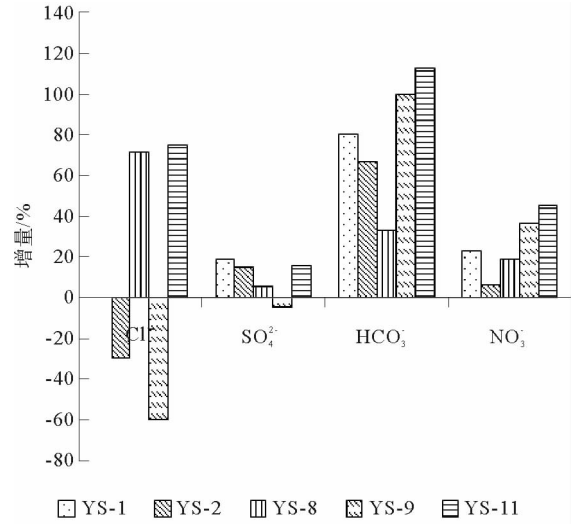


图5 不同岩土阴离子对比图

Fig. 5 Comparison of different rock-soil anion

由图4、图5可以看出:①随着浸泡时间的增加,各岩土样浸泡液中离子含量变化明显,阳离子在浸泡液中的浓度除Mg²⁺离子在个别岩土样(YS-2、YS-9)浸泡液中有所降低外,K⁺、Na⁺、Ca²⁺均明显增加,阴离子除Cl⁻、SO₄²⁻离子在个别浸泡液中有所降低外,HCO₃⁻、NO₃⁻等阴离子含量明显增加。说明水岩相互作用过程中各岩土矿物离子的溶解和吸附以及各矿物离子间的相互作用是一个动态过程,在水岩相互作用达到平衡的过程中各矿物离子在浸泡液中的含量不断变化;②各岩土样浸泡液K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等阳离子中K⁺离子整体变化幅度最小,YS-11土壤样浸泡液K⁺离子增量仅为2%;Na⁺离子增加幅度明显高于K⁺离子,YS-9花岗岩样浸泡液中Na⁺离子增量达200%;Ca²⁺离子增量除YS-8灰岩样为23%外,其他岩土样增量都在50%~60%之间;浸泡液中Mg²⁺离子,除YS-2白云岩样浸泡液减少6%、YS-9花岗岩样浸泡液减少80%外,其他岩土样浸泡液均有所增加;③各岩土样浸泡液NO₃⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻及Cl⁻等阴离子中SO₄²⁻离子整体变化幅度最小,SO₄²⁻离子变化幅度最大的YS-1泥灰岩浸泡液增量仅为19%;④NO₃⁻离子在YS-2白云岩样浸泡液中增加幅度最小,仅为5%,YS-11土壤样浸泡液中增加幅度最大,为45%;⑤HCO₃⁻离子增加幅度在YS-8灰岩样浸泡液中最小,仅为33%,YS-11土壤样浸泡液中最大,达120%;⑥SO₄²⁻离子在各岩土样浸泡液化学组分中整体变化情况最小,在YS-9花岗岩样浸泡液中增量为-4%,在YS-1泥灰岩样浸泡液中增量为19%;⑦Cl⁻离子在各岩土样浸泡液中的变化情况分歧较大,在YS-1泥灰岩样浸泡液中增

量为 0,而在 YS-8 灰岩样浸泡液和 YS-11 土壤样浸泡液中增量分别达 71% 和 75%,但在 YS-2 白云岩样和 YS-9 花岗岩样浸泡液中增量却为 -29% 和 -60%。

分析认为:土壤层中钾离子少,花岗岩中钾钠含量明显高于其他岩土样,而且 Na^+ 在水溶液中是比较稳定的,水中 Na^+ 增多是离子交替吸附作用;灰岩中 Ca^{2+} 主要以碳酸盐形式存在,所以相对其他岩土样含量增加缓慢; Mg^{2+} 矿物载体主要是白云岩,白云岩主要由白云石组成, Mg^{2+} 含量大,花岗岩主要为 SiO_2 组成, MgO 含量很少,花岗岩中 Mg^{2+} 含量很少,短时间浸泡后白云岩和花岗岩浸泡液中 Mg^{2+} 就出现且达到峰值,此后降低。

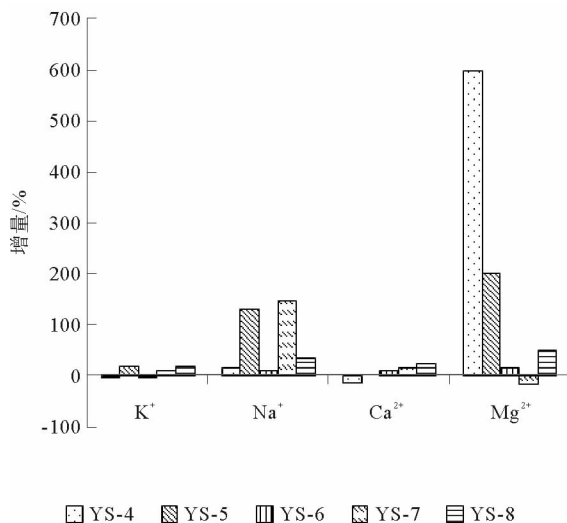


图 6 相同岩土阳离子对比图

Fig. 6 Comparison of same rock-soil cation

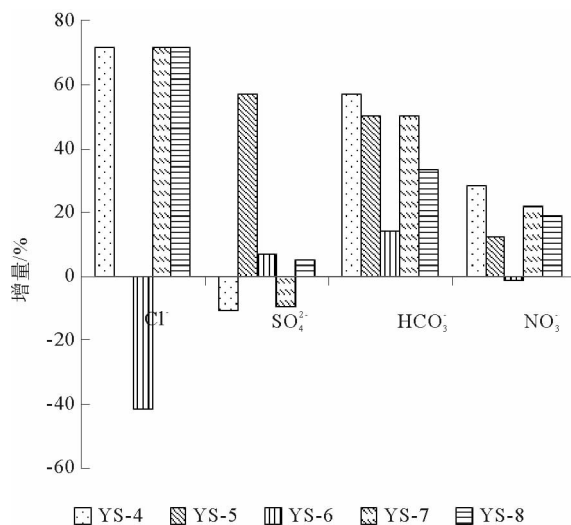


图 7 相同岩土阴离子对比图

Fig. 7 Comparison of same rock-soil anion

3.2.2 相同类型岩石对比

对比结构组分有差异的灰岩,如 YS-4 为鲕粒灰岩,YS-5 为瘤状灰岩,YS-6 为白云质灰岩,YS-7 为竹叶状砾屑灰岩,YS-8 厚层灰岩,对经过浸泡之后水化学的变化特征进行分析(图 6~7)。

由图 6~7 可以看出:①随着浸泡时间的增加,各灰岩中离子含量变化也各不相同;②阳离子除个别如 YS-7 中 Mg^{2+} 及 YS-4 中 K^+ 、 Ca^{2+} 降低之外,其他灰岩中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均呈增加趋势;YS-4 中 Mg^{2+} 甚至达到了 600%;③阴离子中除 HCO_3^- 在各类灰岩中均出现不同程度增加外,且大部分增量都在 40% 以上;其他灰岩中均发生部分阴离子降低情况;④YS-5 和 YS-8 由于浸泡时间增加,水中各离子含量均出现不同程度增加,而且对相同离子两者增加幅度也不相同;⑤阳离子 K^+ 和阴离子 SO_4^{2-} 在 YS-4 鲕粒灰岩浸泡液中含量减少;其中 YS-4 中 K^+ 降低约 5%、 SO_4^{2-} 降低 15%;⑥阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在 YS-6 白云质灰岩的浸泡液中含量减少,YS-6 中 Cl^- 降低 40%、 NO_3^- 降低 3%;⑦阳离子 Mg^{2+} 和阴离子 SO_4^{2-} 在 YS-7 竹叶状砾屑灰岩浸泡液中含量减少,YS-7 中 Mg^{2+} 降低约 10%、 SO_4^{2-} 降低 16%。

因此,灰岩组分含量的不同引起离子含量发生变化:鲕粒灰岩中鲕粒核心填隙物不同,白云质灰岩中存在白云石的影响,竹叶状碎屑灰岩可能是因砾屑填隙物不同,因组分存在的差异性可能就会导致浸泡之后水中离子含量出现减少情况。

3.2.3 不同土壤层对比

以 YS-3、YS-10、YS-11 为例对比土壤层,YS-3、YS-10 为不同地区的土壤层,YS-11 为没有作物种植的土壤层,见图 8~9。

随着浸泡时间的增加,不同类型的土壤中离子含量变化也各不相同:①在土壤没有作物种植时,YS-11 浸泡液各离子含量随时间增加均出现不同程度的增加;②当土壤层有作物种植时, NO_3^- 均出现含量降低的情况;③YS-3 浸泡液中所有检测到的阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})及 Cl^- 均降低, Na^+ 甚至达到 -240%;

④YS-10浸泡液中 Mg^{2+} 降低约 48%、 Cl^- 降低 60%；⑤ SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 在土壤层浸泡液中均增加，YS-3 浸泡液中 SO_4^{2-} 增加到 110%、 HCO_3^- 仅增加 40%；YS-10 浸泡液中 SO_4^{2-} 增加 15%、 HCO_3^- 增加 100%；YS-11 浸泡液中 SO_4^{2-} 增加 16%、 HCO_3^- 增加 120%；⑥YS-10、YS-11 浸泡液中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 变化增量基本相同。

因此，在土壤层没有作物种植时，随着浸泡时间增加，离子逐渐淋溶出来，使浸泡液中离子含量不断增加；但在土壤层有作物种植时，因作物生长需要土壤中的养分以及人类施肥的影响，使不同作物生长改变的土壤层成分不同，所以在浸泡中出现离子变化各不相同的情况；同时作物对土壤层中一些离子的吸收及微生物的生长改变了土壤成分，所以出现浸泡过程中部分离子含量减少的情况。

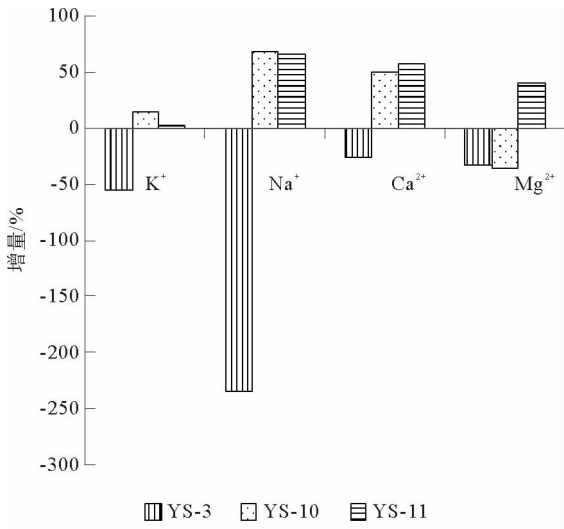


图 8 相同土层阳离子对比图

Fig. 8 Comparison of same soil cation

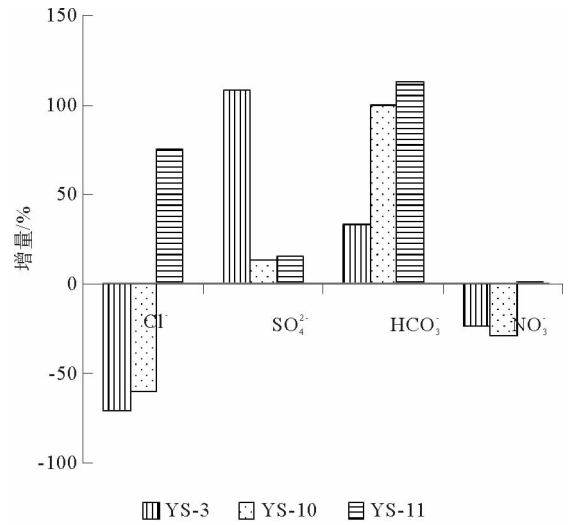


图 9 相同土层阴离子对比图

Fig. 9 Comparison of same soil anion

4 结论

1) 通过对比 5 种不同类型岩土样浸泡试验后的水化学变化可以看出，随着浸泡时间的增加，泥灰岩、灰岩和土壤浸泡水中阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})、阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^-)均出现不同程度的增加，但白云岩中的 Mg^{2+} 、 Cl^- 和花岗岩中 Mg^{2+} 、 Cl^- 及 SO_4^{2-} 却出现不同程度的减少，且花岗岩降低幅度大。

2) 通过对不同结构组分的灰岩浸泡结果比较得出，随着浸泡时间的增加，瘤状灰岩和厚层灰岩浸泡水中各离子均出现不同程度的增加，但是部分阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+})和部分阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})在 YS-7 竹叶状砾屑灰岩浸泡水中出现不同程度减少的情况，且不同结构组分的灰岩减少的离子类型不同，推测可能是因为灰岩结构组分或者填隙物不同，在水流经过时部分离子受吸附作用所致。

3) 通过对比不同土壤层的浸泡结果可以看出，随着浸泡时间的增加，在土壤层没有作物种植时，水经过土壤层向下入渗时各离子含量增加；但是土壤层有作物种植时水流向下入渗，发现 NO_3^- 降低及部分离子(如 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^-)减少，而且土壤层种植不同作物时减少离子类型不同。推测在降水或者地表水通过土壤层向下入渗时，水化学特征会发生变化，且不同土壤层变化不同，在本次试验中发现，经过普通土壤层时离子含量均出现不同程度增加，经过作物种植的土壤层时除 NO_3^- 确定减少外还有部分离子也会出现减少的情况。水流在经过土壤层时，会发生一定的化学反应如 NO_3^- 随时间不断减少，由此也可以看出经过水流不断冲刷，土壤的肥力会降低。

总之，浸泡试验结果说明，在天然降水补给地下水过程中，降水通过对包气带的淋溶作用，使包气带岩土中的大量物质转入水中，水化学性质遂发生了重大变化。由此可认定，地下水的大部分化学组分来源于降水转化为地下水过程中包气带的淋溶作用。

参考文献:

[1]LEE B,HAMM S Y,JANG S,et al. Relationship between groundwater and climate change in South Korea[J]. Geosciences

- Journal, 2013, 18(2): 209-218.
- [2] 邓为难, 伍昌维. 煤矸石模拟浸泡和淋溶实验污染物释放特点的研究[J]. 煤炭技术, 2013, 32(5): 142-144.
DENG Weinan, WU Changwei. Contamination releasing regularity of coal gangue based on soaking and leaching experiments [J]. Coal Technology, 2013, 32(5): 142-144.
- [3] 陈步峰, 周广益, 曾庆波, 等. 热带山地次生雨林的水化学特征及其与降雨量关系的研究[J]. 林业科学研究, 1993, 6(2): 117-123.
CHEN Bufeng, ZHOU Guangyi, ZENG Qingbo, et al. Hydrochemical characteristics and their regression analysis on the secondary rain forest ecosystem of tropical upland in China[J]. Forest Research, 1993, 6(2): 117-123.
- [4] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 等. 岩溶流域土地利用变化对地下水水质的影响: 以云南小江流域为例[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 707-715.
JIANG Yongjun, YUAN Daoxian, XIE Shiyu, et al. Effects of land use change on groundwater quality in karst watershed: A case study in Xiajiang watershed of Yunnan province[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(6): 707-715.
- [5] 杨平恒, 罗鉴银, 袁道先, 等. 降雨条件下岩溶槽谷泉水的水文地球化学特征[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 67-74.
YANG Pingheng, LUO Jianyin, YUAN Daoxian, et al. Respponse of spring water hydrochemical behaviors to rainfall in karst subterranean river system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 67-74.
- [6] 孟庆斌, 邢立亭, 滕朝霞. 济南泉域“三水”转化与泉水恢复关系研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(5): 82-87.
MENG Qingbin, XING Liting, TENG Zhaoxia, et al. The relationship of spring protection and transformation pattern between precipitation groundwater and surface water in the Jinan spring region[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 38(5): 82-87.
- [7] 郑顺安, 陈春, 郑向群, 等. 模拟降雨条件下22种典型土壤镉的淋溶特征及影响因子分析[J]. 环境化学, 2013, 32(5): 867-873.
ZHENG Shunan, CHEN Chun, ZHENG Xiangqun, et al. Effect of simulated rain on leaching of cadmium from 22 typical soils and key factors identification[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(5): 867-873.
- [8] 杨平恒, 旷颖仑, 袁文昊, 等. 降雨条件下典型岩溶流域地下水中的物质运移[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3249-3255.
YANG Pingheng, KUANG Yinglun, YUAN Wenhao, et al. Substances transport in an underground river of typical karst watershed during storm events[J]. Environmental Science, 2009, 30(11): 3249-3255.
- [9] 陆晴, 王玉刚, 李彦, 等. 淋溶条件下土地利用方式对土壤有机碳含量及其理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 242-252.
LU Qing, WANG Yugang, LI Yan, et al. Effects of land use types on soil organic contents and physical and chemical properties under the leaching conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3): 242-252.
- [10] 吴代赦, 郑宝山, 康往东, 等. 煤矸石的淋溶行为与环境影响的研究: 以淮南潘谢矿区为例[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 55-59.
WU Daishe, ZHENG Baoshan, KANG Wangdong, et al. Leaching behavior of coal spoils and environmental impacts[J]. Earth and Environment, 2004, 32(1): 55-59.
- [11] 贾红霞, 肖昕, 张双, 等. 济宁三矿煤矸石中重金属释放规律的浸泡试验研究[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(6): 97-101.
JIA Hongxia, XIAO Xin, ZHANG Shuang, et al. Release rules of heavy metals in different Jining III weathering gangue in immersion test[J]. Clean Coal Technology, 2009, 15(6): 97-101.
- [12] 田采霞, 郭保华, 宋晓梅. 贮灰场粉煤灰中微量元素的浸泡试验研究[J]. 粉煤灰, 2007, 19(5): 21-23.
TIAN Caixia, GUO Baohua, SONG Xiaomei. Experimental study of microelements in immersed fly ash in stockpile[J]. Coal Ash, 2007, 19(5): 21-23.

(责任编辑: 高丽华)